

УДК 621.165

В.П. СУББОТОВИЧ, канд. техн. наук; проф. НТУ «ХПИ»;**Ю.А. ЮДИН**, канд. техн. наук; проф. НТУ «ХПИ»;**А.В. ЛАПУЗИН**, канд. техн. наук; доц. НТУ «ХПИ»;**А.Ю. ЮДИН**, канд. техн. наук; с.н.с. НТУ «ХПИ»

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УЧАСТКА ВЫХОДНОГО ДИФFUЗОРА ТУРБИНЫ СО СПЕЦИАЛЬНЫМ ВДУВОМ ПОТОКА

Приведены результаты расчетных исследований аэродинамики диффузора, характерного для выходных патрубков современных паровых турбин, при наличии специального вдува потока на внешнем обводе диффузора и надбандажной протечки. Показаны особенности течения в той части выходного диффузора, который расположен со стороны противоположной конденсатору, и определены его коэффициенты потерь при различных сочетаниях параметров специального вдува и надбандажной протечки.

Ключевые слова: аэродинамические исследования, выходной диффузор турбины, специальный вдув потока, надбандажная протечка.

Введение

На наружном обводе осерадиальных диффузоров выходных патрубков турбомашин велика вероятность отрыва потока, что связано с резким изменением направления потока от осевого к радиальному и появлению значительных градиентов давления. Для повышения эффективности осерадиальных диффузоров турбомашин используют различные способы управления течением на наружном обводе диффузора [1]. В современных паровых турбинах одним из таких способов является организация специального вдува потока на поверхности диффузора [2, 3]. Кроме того, естественная надбандажная протечка, имеющая место во всех конструкциях турбомашин, также может влиять на течение аналогично вдуву потока в пограничный слой [4].

Особенностью осерадиальных диффузоров выходных патрубков с односторонним выходом рабочего тела из сборной камеры является различный характер течения в каждом из участков в окружном направлении. Если со стороны конденсатора потоку в диффузоре и сборной камере достаточно повернуться на 90°, то с противоположной стороны поворот потока увеличивается до 270°.

В статье приведены результаты расчетных исследований участка выходного диффузора со стороны противоположной конденсатору одной из паровых турбин при различных сочетаниях параметров, определяющих совместное влияние надбандажной протечки и специального вдува потока на наружной поверхности.

Расчетная модель и параметры рабочего тела

Расчет выполнялся с помощью коммерческой *CFD* программы, позволяющей рассчитывать трехмерные, сжимаемые, вязкие, нестационарные потоки. В исследуемой осесимметричной модели диффузора имелось три входных сечения – 1, 2, 3 и одно выходное – 4 (рис. 2а). Поток от входного сечения 1 к выходному сечению 4 поворачивался на ~270°.

В сечении 1 задавались параметры P_1^* и T_1^* заторможенного потока, имитирующего выход рабочего тела из последней ступени до бандаж. В сечении 2 задавались параметры P_2^* и T_2^* заторможенного потока, имитирующего надбандажную

© В.П. Субботович, Ю.А. Юдин, А.В. Лапузин, А.Ю. Юдин, 2013

протечку. Для этого организована камера с входным сечением 2, на выходе которой имеется кольцевой цилиндрический канал, образованный начальным участком наружного обвода и надбандажным кольцом. В сечении 3 задавались параметры P_3^* и T_3^* заторможенного потока, который специально вдувается на торцовую наружную поверхность осерадиального диффузора через кольцевой конфузорный канал, расположенный на выходе камеры с входным сечением 3. В реальной конструкции выхлопного патрубка параметры внутри этой камеры регулируют сбросом потока из дополнительных отверстий в область пониженного давления. В выходном сечении 4 задавалось статическое давление – P_4 , значение которого по отношению к давлению торможения во входном сечении 1 определяло один из режимов работы последней ступени. В качестве рабочего тела принят воздух.

Неизменные параметры для всех вариантов расчета: давление и температура торможения в сечении 1 – $P_1^* = 120,6$ кПа; $T_1^* = 323$ К, статическое давление в сечении 4 – $P_4 = 101,3$ кПа.

Варьируемые параметры: давления торможения P_2^* и P_3^* . Давление P_2^* принимало 5 значений – 94,3; 101,3; 121,3; 141,3; 161,3 кПа. Давление P_3^* принимало от 6 до 10 значений в диапазоне от 99,8 кПа до 181,3 кПа для каждого задаваемого давления P_2^* . Количество значений P_3^* определялось характером зависимости коэффициента полных потерь диффузора от параметров, определяющих надбандажную протечку и специальный вдув потока. При минимальных значениях P_2^* и P_3^* надбандажная протечка и специальный вдув потока практически отсутствовали.

Следует отметить, что статическое давление P_1 и соответственно число Маха M_{c1} в сечении 1 изменялись и зависели от коэффициента полных потерь диффузора, на значение которого существенное влияние оказывали надбандажная протечка и специальный вдув потока. Осредненные числа Маха M_{c1} на входе в диффузор составляли 0,44–0,56. Минимальное значение $M_{c1} = 0,44$ соответствовало наибольшему в расчетах значению коэффициента полных потерь диффузора – 1,06, а максимальное $M_{c1} = 0,56$ – наименьшему его значению – 0,68.

Анализируемые характеристики диффузора

$$\text{Коэффициент полных потерь: } \zeta_{\pi} = \frac{1 - \left(P_4/P_1^*\right)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \left(P_1/P_1^*\right)^{\frac{k-1}{k}}}.$$

$$\text{Коэффициент потерь с выходной скоростью: } \zeta_{\text{вых}} = \frac{1 - \left(P_4/P_4^*\right)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \left(P_1/P_1^*\right)^{\frac{k-1}{k}}}.$$

$$\text{Коэффициент внутренних потерь: } \zeta = \zeta_{\pi} - \zeta_{\text{вых}}.$$

Специальный вдув характеризовался двумя параметрами: давлением торможения P_3^* и коэффициентом импульса струи вдува $C_{\mu 3}$ (коэффициент $C_{\mu 3}$ изменялся в диапазоне 0,004–0,195)

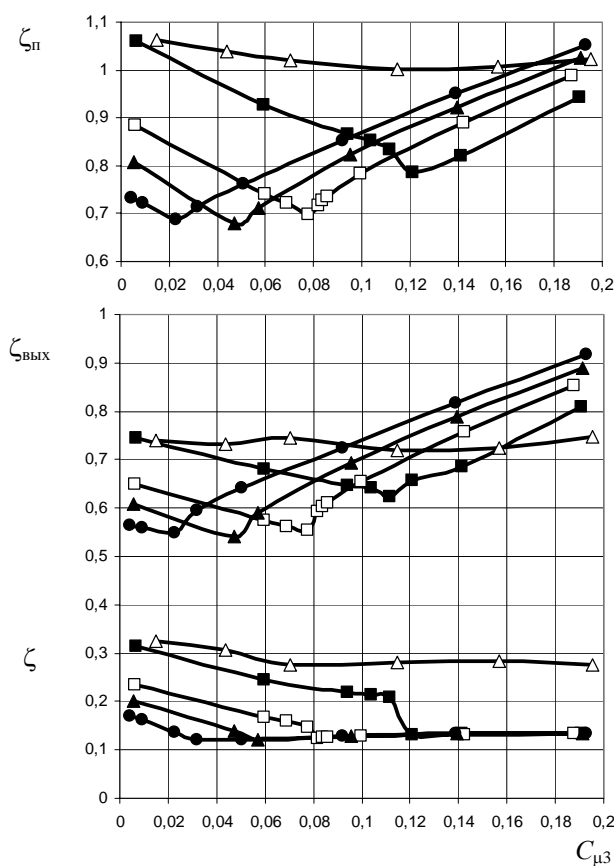
$$C_{\mu 3} = \frac{2G_3 C_3}{G_1 C_1},$$

где G_1 и C_1 – расход и осредненная скорость потока в сечении I ; G_3 и C_3 – расход и осредненная скорость потока специального вдува.

Аналогичный коэффициент импульса используют в авиации [5] для характеристики вдува потока на отклоняющийся закрылок самолета. Только используют другую форму записи $C_{\mu 3} = G_3 C_3 / F_1 (\rho_1 C_1^2 / 2)$ и в качестве характерной площади F_1 принимают площадь закрылка самолета.

Надбандажная протечка охарактеризована параметром – давлением P_2^* .

Результаты расчетных исследований представлены на рис. 1–3.



Δ – $P_2^* = 94,3$; \blacksquare – $101,3$; \square – $121,3$;
 \blacktriangle – $141,3$; \bullet – $161,3$

Рис. 1 – Коэффициенты потерь диффузора

на течение и характеристики диффузора. Повышение давления P_2^* , т.е. увеличение скорости надбандажной протечки, снижает оптимальные значения коэффициента импульса $C_{\mu 3}$ специального вдува. Так давлению $P_2^* = 101,3; 121,3; 141,3; 161,3$ кПа соответствуют следующие значения оптимального коэффициента импульса $C_{\mu 3}$ – 0,12; 0,078; 0,047; 0,023. При этом получены практически одинаковые минимальные коэффициенты полных потерь $\zeta_n = 0,68–0,7$ для трех последних значений $C_{\mu 3}$.

Следует заметить, что характер зависимости коэффициента полных потерь $\zeta_n = f(C_{\mu 3})$ в основном определяется коэффициентом потерь с выходной скоростью

Коэффициенты потерь диффузора представлены на рис. 1. в виде зависимостей коэффициента полных потерь ζ_n диффузора и его составляющих – коэффициентов внутренних потерь ζ и потерь с выходной скоростью $\zeta_{\text{вых}}$ от коэффициента импульса $C_{\mu 3}$ при 5-ти значениях давления P_2^* .

В варианте расчета с минимальным давлением торможения $P_2^* = 94,3$ кПа, при котором надбандажная протечка практически отсутствует, специальный вдув слабо влияет на коэффициенты потерь диффузора, а коэффициент полных потерь ζ_n имеет значения больше 1, т.е. диффузор не восстанавливает давление. Это связано с тем, что при отсутствии надбандажной протечки, основной поток не присоединяется к наружному обводу диффузора во всем диапазоне параметров, характеризующих специальный вдув потока. При наличии надбандажной протечки ($P_2^* > 94,3$ кПа) специальный вдув положительно влияет

$\zeta_{\text{вих}} = f(C_{\mu 3})$ и отличается от характера зависимости коэффициента внутренних потерь $\zeta = f(C_{\mu 3})$. При увеличении коэффициента $C_{\mu 3}$ внутренние потери уменьшаются до значений $\zeta = 0,12-0,13$ и практически не изменяются при дальнейшем росте $C_{\mu 3}$.

Таким образом, оптимальные параметры специального вдува потока необходимо согласовывать с параметрами надбандажной протечки, которая, как известно, определяется многими факторами, а именно: периферийной степенью реактивности, углом выхода потока из направляющего аппарата на периферии, величиной радиального зазора, межвенцовым зазором, перекрышей и др.

Распределение параметров внутри диффузора представлено на рис. 2 линиями тока и на рис. 3 распределением числа Маха. В качестве примера представлены три варианта расчета при следующих сочетаниях параметров надбандажной протечки и специального вдува потока: давление P_2^* фиксировано и равно 121,3 кПа, а давление P_3^* и соответствующий коэффициент $C_{\mu 3}$ принимали значения – 99,8; 131,3; 181,3 кПа и 0,006; 0,078; 0,187.

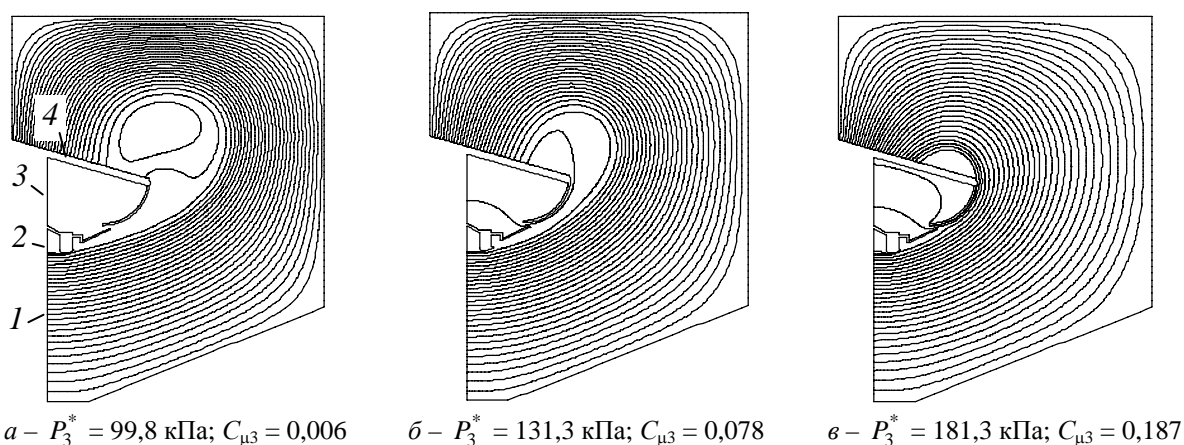
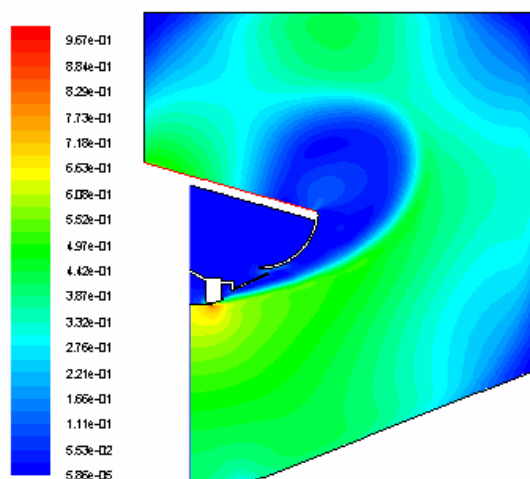
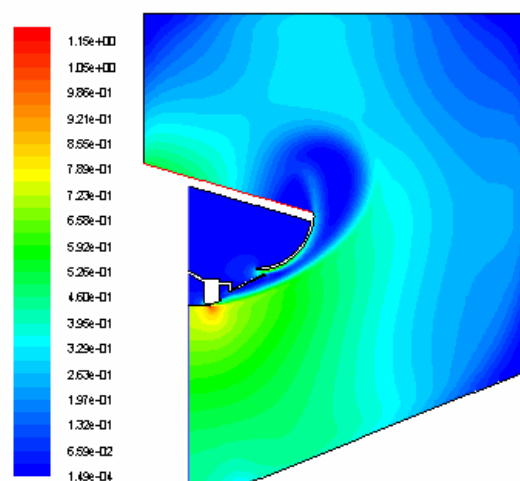


Рис. 2 – Линии тока в диффузоре при трех значениях давления P_3^* и коэффициента $C_{\mu 3}$ и фиксированном давлении $P_2^* = 121,3$ кПа

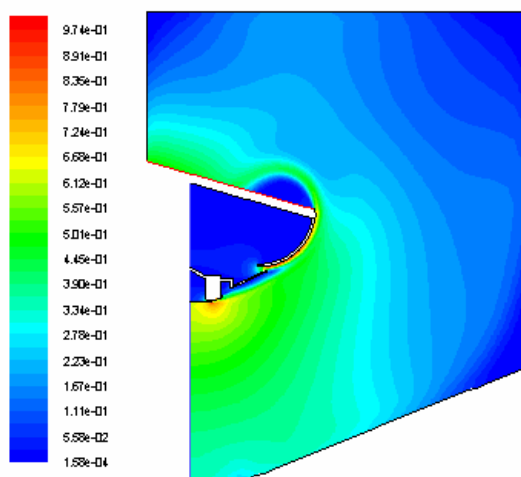
При минимальных значениях параметров $P_3^* = 99,8$ кПа и $C_{\mu 3} = 0,006$, когда специальный вдув практически отсутствует, поток отрывается от наружного обвода диффузора вблизи входного сечения 1 (см. рис. 2а и 3а). Коэффициент полных потерь $\zeta_{\text{п}} = \zeta + \zeta_{\text{вих}} = 0,24 + 0,65 = 0,89$ имеет относительно большое значение, как за счет внутренних потерь, так и потерь с выходной скоростью. При увеличении параметров специального вдува до оптимальных $P_3^* = 131,3$ кПа, $C_{\mu 3} = 0,078$ течение в диффузоре становится безотрывным (рис. 2б и 3б) и все анализируемые коэффициенты потерь снижаются до минимальных значений $\zeta_{\text{п}} = \zeta + \zeta_{\text{вих}} = 0,14 + 0,56 = 0,7$. Параметры специального вдува выше оптимальных, несмотря на безотрывное течение в диффузоре, являются избыточными, так как увеличивается потеря с выходной скоростью, зависящая не только от уровня скорости, но и от степени неравномерности потока в выходном сечении 4. Так при предельных в расчетах значениях $P_3^* = 181,3$ кПа и $C_{\mu 3} = 0,187$ коэффициенты полных потерь и потерь с выходной скоростью достигают максимальных значений $\zeta_{\text{п}} = 0,98$ и $\zeta_{\text{вих}} = 0,85$, а поток прижат к наружному обводу диффузора (рис. 2в и 3в).



$$a - P_3^* = 99,8 \text{ кПа}; C_{\mu 3} = 0,006$$



$$б - P_3^* = 131,3 \text{ кПа}; C_{\mu 3} = 0,078$$



$$в - P_3^* = 181,3 \text{ кПа}; C_{\mu 3} = 0,187$$

Рис. 3 – Распределение числа Маха в диффузоре при трех значениях давления P_3^* и коэффициента $C_{\mu 3}$ и фиксированном давлении $P_2^* = 121,3 \text{ кПа}$

Выводы

Определены коэффициенты потерь и исследован характер течения участка выходного диффузора паровой турбины со стороны, противоположной конденсатору, при различных сочетаниях параметров, определяющих совместное влияние надбандажной протечки и специального вдува потока на наружной поверхности диффузора. Показано, что на оптимальные параметры специального вдува существенно влияет надбандажная протечка. Приведенные в статье результаты можно рассматривать в качестве практических рекомендаций для улучшения характеристик выходных диффузоров паровых турбин.

Список литературы: 1. Мигай, В.К. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин [Текст] / В.К. Мигай, Э.И. Гудков – Л.: Машиностроение, 1981 – 272 с. 2. Пат. 2053373 Российская Федерация, МПК F 01 D 25/30 Выхлопная часть турбомашин [Текст] / Косяк Ю.Ф., Вирченко М.А., Галацан В.Н. и др.; Заявитель и патентообладатель ОАО «Турбоатом». – №4649389; заявл. 13.02.89; опубл. 27.01.96., Бюл. № 3. – 3 с.: ил. 3. Юдин, А.Ю. Исследование осесимметричных диффузоров выходных патрубков турбомашин со специальным вдувом потока [Текст] / А.Ю. Юдин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 3(80). – С. 80-84. 4. Гаркуша, А.В. Особенности совместной работы ступени и выхлопного патрубка турбины при различных радиальных зазорах над рабочим колесом [Текст] / А.В. Гаркуша, В.Е. Добрынин, А.В. Лапузин, Ю.А. Юдин // Теплоэнергетика, 1988. – № 8. – С. 33-36. 5. Чжен, П. Управление отрывом потока [Текст] / П. Чжен. – М. Мир, 1979 – 552 с.

Поступила в редколлегию 01.02.13

УДК 621.165

Аэродинамические исследования участка выходного диффузора турбины со специальным вдувом потока [Текст] / В.П. Субботович, Ю.А. Юдин, А.В. Лапузин, А.Ю. Юдин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 12(986). – С. 30-35. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X.

Наведені результати розрахункових досліджень аеродинаміки диффузора, характерного для вихідних патрубків сучасних парових турбін, при наявності спеціального вдуву потоку на зовнішньому обводі диффузора і понад бандажної витоки. Показані особливості течії у тій частині вихідного диффузора, що розташований зі сторони протилежної конденсатору, та визначені його коефіцієнти втрат при різних сполученнях параметрів спеціального вдуву та понад бандажної витоки.

Ключові слова: аеродинамічні дослідження, вихідний диффузор турбіни, спеціальний вдув потоку, понад бандажна витока.

The calculation aerodynamics investigation results of exhaust manifold diffuser of the modern steam turbines with a special injection flow are described. Features of flow at diffuser part, which placed in exhaust manifolds opposite condenser are demonstrated. Diffuser loss coefficients with different combinations characteristic of the special injection flow and the shroud ring radial leakage are defined.

Keywords: aerodynamical investigations, turbine exhaust diffuser, special flow injection, shroud ring radial leakage.